

بررسی تغییرات هیدرودینامیک بستر سیال با مقایسه جاذب سیگنال‌های ارتعاشی بستر به روش آماری دیکس

فاطمه محمدی، رحمت ستوده قره باغ^{*}، هدایت عزیزپور، رضا ضرغامی و نوید مستوفی

آزمایشگاه سیستم‌های چند فازی، دانشکده مهندسی شیمی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۳/۳/۲۷ تاریخ پذیرش: ۹۳/۹/۴

چکیده

راکتورهای بستر سیال در صنعت نفت از اهمیت بسیاری برخوردارند. پایش دائمی هیدرودینامیک این بسترها به جهت شناخت عوامل ایجادکننده کلوخه و خردشدن ذرات بسیار پراهمیت است. در این تحقیق از روش غیر تداخلی ارتعاشات به منظور تعیین پارامترهای هیدرودینامیکی بستر سیال استفاده شده است. همچنین ارزیابی سری زمانی سیگنال‌های ارتعاشی بستر در حوزه فضای حالت صورت گرفته است. آزمایش‌ها در یک بستر سیال آزمایشگاهی با قطر داخلی ۱۵ cm و ارتفاع ۲ m انجام شده است. ابتدا اثر ارتفاع بستر سیال پر شده توسط شن با قطر متوسط $470 \mu\text{m}$ و دانسیته 2640 kg/m^3 مورد تحلیل قرار گرفت و سپس تاثیر نوع شن با قطرهای متوسط $226 \mu\text{m}$ و $700 \mu\text{m}$ مورد استفاده در بستر سیال روی پارامترهای هیدرولیکی بستر سیال مورد بررسی قرار گرفت. در ادامه با تغییر سرعت هوای ورودی به بستر، تاثیر تغییر رژیم جریانی در بستر از حبابی به درهم روی پارامترهای هیدرولیکی بستر بررسی شد. برای بازسازی سامانه بستر سیال در حوزه فضای حالت، از روش تاخیرهای زمانی استفاده شده است و پارامترهای لازم برای بازسازی جاذب‌ها بهینه شده‌اند. با مقایسه جاذب‌های مختلف، حساسیت روش آماری دیکس به تغییرات ارتفاع بستر، نوع شن و سرعت هوای ورودی به بستر، مورد تایید قرار گرفته است. این روش از آن جهت اهمیت پیدا می‌کند که امکان تشخیص تغییرات در هیدرودینامیک راکتورهای چند فازی و سیستم‌های مشابه را مهیا نموده و فرصت لازم را برای کنترل این تغییرات فراهم می‌آورد.

کلمات کلیدی: بستر سیال، جاذب، فضای حالت، سیگنال ارتعاشی و روش آماری دیکس

مقدمه

ضرایب انتقال حرارت و انتقال جرم بزرگ، قابلیت چرخش مخلوط گاز-جامد و موارد دیگر اشاره نمود[۱]. بسترهای سیال به دلیل آن که زمینه‌ساز تماس مؤثر بین جامد و سیال هستند در صنایع شیمیایی از اهمیت بسیاری برخوردارند و کاربرد آنها در صنایع نفت، پتروشیمی، شیمیایی و غیره بیان‌گر این حقیقت است.

سیال‌سازی فرآیندی است که در آن ذرات جامد با معلق شدن در یک گاز یا مایع به حالت شبه‌سیال تبدیل می‌شوند. از خواص راکتورهای بستر سیال می‌توان به تماس مطلوب بین گاز و ذرات جامد،

دو بعدی برای پایش دائمی بستر سیال بهره برد ولی او نیز به میزان حساسیت روش خود اشاره‌ای نکرد [۱۱].

کنل نیز براساس دیدگاه نزدیک‌ترین همسایه^۱ یک روش آماری را برای تشخیص وضعیت بستر سیال ارائه کرد [۱۲]. داو و همکارانش و فین نی و همکارانش یک روش آماری نمادین^۲ برای پایش وضعیت سیالی بستر ارائه کردند. در روش آن روند تغییرات نمادین مورد نظر در طول سری زمانی دنبال می‌شود [۱۴] و [۱۳]. شاوتن و وندن بلیک قابلیت پیش‌بینی کوتاه مدت^۳ را برای پایش هیدرودینامیک بستر سیال پیشنهاد دادند [۱۵]. ون اومن و همکارانش از شاخص آماری دیکس برای پایش دائمی حالت سیالی بستر سیال استفاده کردند [۱۶].

هدف اصلی این پژوهش مطالعه کیفیت و هیدرودینامیک بستر سیال می‌باشد. تغییر در اندازه ذرات موجود در بستر باعث تغییرات هیدرودینامیک سیستم‌های چند فازی می‌شود. به دلیل وجود نوسان‌های شدید فشار در بستر سیال که از طبیعت پدیده سیال شدن ناشی می‌شود، تشخیص تغییرات کیفیت سیالیت و هیدرودینامیکی بستر از طریق مطالعه سیگنال‌های اندازه‌گیری شده بستر امکان‌پذیر است.

شرح کلی روش تحلیل نتایج

در این قسمت سعی شده است تا با به‌کارگیری روشی که به تغییرات در هیدرودینامیک حساس می‌باشد، راه حلی برای برخی از مشکلات ایجاد شده در بسترهای سیال از قبیل غیر سیالی شدن ناگهانی بستر و تغییر اندازه ذرات در اثر ایجاد کلوخه ارائه شود. اساس این روش بر مقایسه دو جاذب^۴ استوار است که این مقایسه به‌وسیله روش ارائه شده توسط دیکس و همکاران انجام می‌شود [۱۷].

یکی دیگر از کاربردهای آن مربوط به واکنش‌های شیمیایی است که در آنها از ذرات جامد به‌عنوان کاتالیست یا ماده اولیه استفاده می‌شود. در واکنش‌هایی که بازده آنها به چگونگی تماس فازهای مختلف بستگی دارد، شناخت هیدرودینامیک فازهای واکنش‌دهنده از اهمیت به‌سزایی برخوردار است. با وجود برتری‌های فراوان بسترهای سیال، استفاده از آنها دارای نقاط ضعفی نیز است که کاربرد صنعتی آن را با محدودیت روبرو می‌کند. تغییرات ناخواسته و ناگهانی در هیدرودینامیک بستر و غیرسیالی شدن آن در نتیجه کلوخه شدن، زیان‌آور است. شناخت عوامل ایجادکننده کلوخه و خردشدن ذرات در بسترهای سیال و یافتن روش‌های مناسب در پیش‌بینی و پیشگیری از این پدیده‌ها بسیار موثر می‌باشند. از این رو مطالعه تغییرات هیدرودینامیک بستر سیال و پایش دائمی آن بسیار مهم و پراهمیت است.

بیشتر روش‌های ارزیابی سیگنال، در حوزه زمان و با استفاده از سیگنال‌های فشار به مطالعه انتقال رژیم جریانی پرداخته‌اند [۴-۲]. برخی از محققین از تحلیل سیگنال در حوزه فرکانس مانند تحلیل طیف فرکانسی سیگنال و تبدیل موجک برای بررسی وضعیت بستر استفاده کرده‌اند [۵-۸]. ون اومن و همکارانش نشان دادند که چگالی طیف قدرت سیگنال فشار تقریباً نسبت به تغییرات کوچک توزیع اندازه ذرات غیرحساس می‌باشد و نمی‌توان از این روش برای پایش دائمی بستر به منظور تشخیص تغییر اندازه ذرات استفاده کرد [۹].

روش‌های پایش بستر سیال اغلب در حوزه فضای حالت صورت می‌گیرند و داو و هالو و ون اومن اولین نفراتی بودند که پایش وضعیت هیدرودینامیک بستر سیال را از روی آنالیز غیر خطی سری زمانی انجام دادند [۹ و ۱۰].

در روش آنها برخی از ویژگی‌های میانگین جاذب بازسازی شده در هر لحظه محاسبه می‌گردد. رایت از تبدیل فوریه توزیع احتمال جاذب بازسازی شده

1. Nearest Neighbor

2. Symbolic

3. Short Term Predictability

4. Attractor

روش بازسازی جاذب از روی سری زمانی در شکل ۱ نشان داده شده است. در این شکل d برابر با ۳ و τ برابر با زمان نمونه‌برداری (مطابق با $1/f_s=1$) انتخاب شده‌اند. در اینجا با در نظر گرفتن سری زمانی اصلی (مرجع) e و مقایسه آن با سری زمانی ارزیابی y ، کار شروع می‌شود. باید توجه داشت که سری زمانی مرجع باید بیانگر یک حالت بهینه در بستر سیال باشد و طول سری‌های زمانی باید به گونه‌ای انتخاب شود که بیانگر هیدرودینامیک بستر باشد. در اینجا ابتدا باید پارامترهای لازم برای محاسبات بهینه شوند و سپس با مقایسه جاذب‌های حاصل تغییر در کیفیت سیالیت دو حالت مختلف تشخیص داده می‌شود.

بخش تجربی

تجهیزات اندازه‌گیری و روش‌های انجام آزمایش‌ها

آزمایش‌ها در بستر آزمایشگاهی از جنس Plexiglass با قطر داخلی ۱۵ cm و ارتفاع ۲ m و برای سه نوع شن با قطر متوسط $226 \mu\text{m}$ (نوع ۳)، $470 \mu\text{m}$ (نوع ۱) و $720 \mu\text{m}$ (نوع ۲) با دانسیته 2640 kg/m^3 صورت گرفته است. همچنین آزمایش‌های مشابهی برای بسترهای پر شده از شن تا ارتفاع ۷/۵ و ۱۵ و ۲۲/۵ cm انجام شد. نمای کلی بستر سیال شده در شکل ۲ ارائه شد است. برای اطمینان از تکرارپذیری، هر آزمایش حداقل ۳ بار تکرار شد. برای انتخاب فرکانس نمونه‌برداری مناسب برای آزمایش نمونه‌برداری در ابتدا با بالاترین فرکانس ممکن (۶۵ kHz) انجام شد و در این تحقیق نمونه‌برداری به مدت ۳۰ s انجام شده است. برای انجام آزمایش و ثبت داده‌های ارتعاشی، از شتاب‌سنج مدل A/120/V ساخت شرکت Bruel & Kjaer استفاده شده است.

این روش، تغییرات ناگهانی رخ داده در هیدرودینامیک بسترهای سیال را بدون این که اطلاعات خاصی راجع به طبیعت آن بدهد تشخیص می‌دهد. دیکس و همکارانش روشی برای محاسبه مجذور فاصله بین دو مجموعه بردارهای تأخیری 1 (مثلاً دو جاذب) ارائه دادند [۱۷]. \overline{S} نشانه اختلاف بین دو مجموعه بردار تأخیری می‌باشد و V_e واریانس \overline{S} است. با تصحیح روابط مربوط به برآورد \overline{S} و V_e ، شاخص دیکس به صورت رابطه ۱ تعریف می‌گردد.

$$s = \frac{\overline{S}}{\sqrt{V_e \overline{S}}} \quad (1)$$

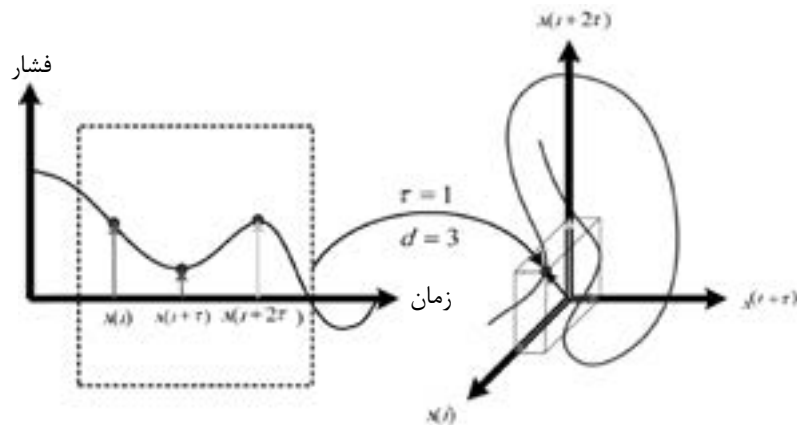
دیکس و همکارانش مدعی شدند که مقدار S برای دو توزیع یکسان برابر با صفر و با انحراف از معیار واحد می‌باشد [۱۷]. ون اومن و همکارانش مقدار ۳ را به عنوان مقدار حدی برای آزمون فرض در نظر گرفتند. به این معنی که اگر مقدار S بزرگ‌تر از ۳ باشد با ۹۵٪ سطح معنی دار بودن می‌توان گفت که دو جاذب از یک سامانه ایجاد نشده‌اند [۱۸]. جاذب نمایش‌دهنده دینامیک سامانه در فضای حالت است. جاذب سامانه را می‌توان از روی سری زمانی تنها یک متغیر حالت 2 (مانند سیگنال ارتعاش بستر سیال) بازسازی کرد. به جاذب فوق، جاذب بازسازی شده 2 می‌گویند. این ایده که اولین بار توسط پاکارد و همکارانش و تاکنز معرفی گردید به قضیه محاط 4 معروف است [۲۰ و ۱۹].

تاکنز اثبات کرده است که جاذب بازسازی شده دارای همان ویژگی‌های جاذب واقعی سامانه می‌باشد [۲۰]. با بازسازی جاذب سیگنال، سیگنال از حوزه زمان به حوزه فضای حالت انتقال می‌یابد [۱۶]. در روش تأخیرهای زمانی، نقاط بازسازی شده جاذب، $s(i)$ در حوزه فضای حالت به صورت زیر بیان می‌گردند:

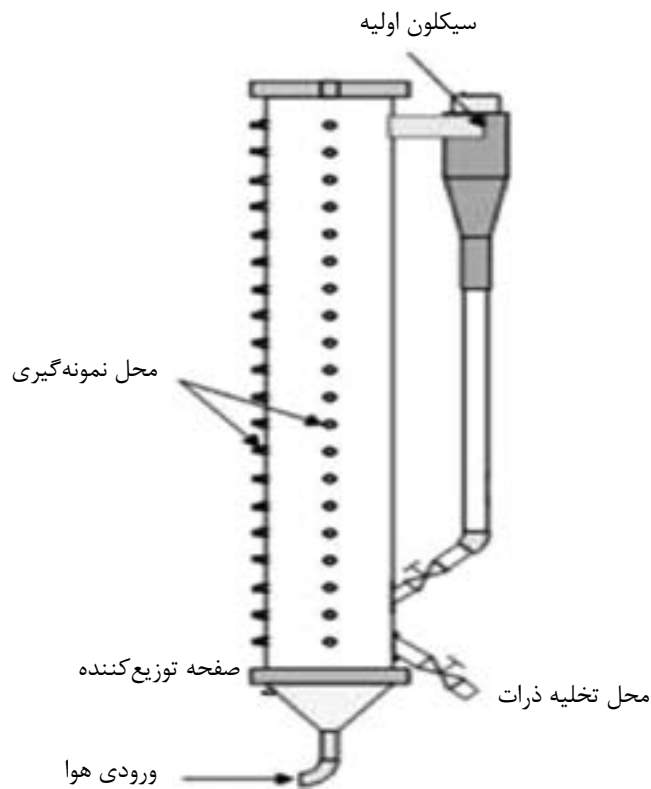
$$\vec{x}(i) = \{x(i), x(i+\tau), \dots, x[i+(d-1)\tau]\} \quad (2)$$

پارامتر d بعد محاطی و τ تأخیر زمانی نام دارد که گاهی به پارامترهای محاطی 5 نیز معروف می‌باشند.

1. Delay Vector
2. State (Characteristic) Variable
3. Reconstructed Attractors
4. Embedding
5. Embedding Parameters
6. Reference
7. Evaluation



شکل ۱ بازسازی جاذب از روی سری زمانی به روش تأخیرهای زمانی.



شکل ۲ نمایی از بستر سیال شده آزمایشگاهی.

نادرست برحسب بعد محاطی برای یک نمونه از سری‌های زمانی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود درصد نقاط همسایگی نادرست با افزایش بعد محاطی کاهش می‌یابد و در بعد محاطی برابر ۴۴ این درصد به صفر می‌رسد. این موضوع نشان می‌دهد که بعد محاطی سامانه بستر سیال با روش فوق برابر ۴۴ است.

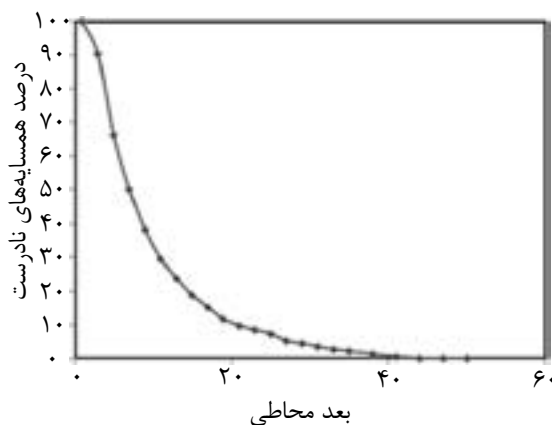
1. Embedding Dimension
2. False Neighbors

نتایج و بحث

تنظیم پارامترهای لازم برای محاسبات

بعد محاطی^۱

برای به‌دست آوردن بعد محاطی از روش همسایه‌های نادرست^۲ استفاده شده است. به این ترتیب که تعداد زیادی از سری‌های زمانی به صورت تصادفی انتخاب شده و بعد محاطی آنها توسط این روش محاسبه شده است. شکل (۳)، درصد نقاط همسایگی



شکل ۳ درصد نقاط همسایه‌های نادرست بر حسب بعد محاطی برای سری زمانی نمونه.

تاخیر زمانی^۱

تأخیر زمانی τ برای بازسازی جاذب از روی سری زمانی یکی از متغیرهای بسیار مهم است و باید به گونه‌ای انتخاب شود که جاذب بازسازی شده مانند جاذب اصلی سامانه شود. همان‌گونه که در شکل (۴) مشاهده می‌شود این تأخیر زمانی که پارامتری بدون بعد است نشان می‌دهد که نمونه‌های زمانی گسسته‌ای که برای ساخت جاذب مورد استفاده قرار می‌گیرند با چه فاصله‌ای از هم برداشته می‌شوند. همبستگی بین دو نقطه که با تأخیر زمانی τ از یکدیگر قرار دارند به وسیله تابع خود همبستگی بیان می‌شود. در اینجا از تابع خود همبستگی جهت انتخاب تأخیر زمانی مناسب استفاده شده تا اطمینان حاصل شود که دو داده نقطه‌ای $x(i)$ و $x(i + \tau)$ به اندازه کافی مستقل هستند. شکل ۴ تابع خود همبستگی سیگنال‌های ارتعاشی را بر حسب τ (تأخیر زمانی) نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود تأخیر بالای ۱۰۰ تابع خود همبستگی تقریباً صفر است. به بیان دیگر وقتی داده‌های نقطه‌ای با تأخیر بالای ۱۰۰ از هم قرار می‌گیرند، تقریباً مستقل از یکدیگرند [۲۱-۲۳].

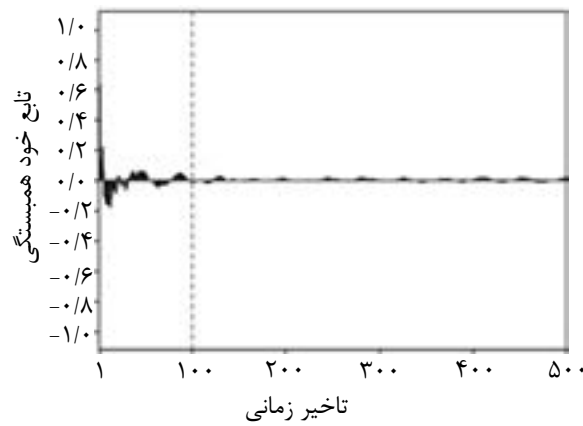
پهنای باند

پهنای باند پارامتری بی‌بعد است که برای هموارسازی نقاط در فضای حالت به کار می‌رود و انتخاب مقدار پهنای برای آن نقش بارزی در قدرت روش آماری دیکس دارد. شکل ۵ روند تغییرات شاخص دیکس با پهنای باند به‌طور متوسط برای

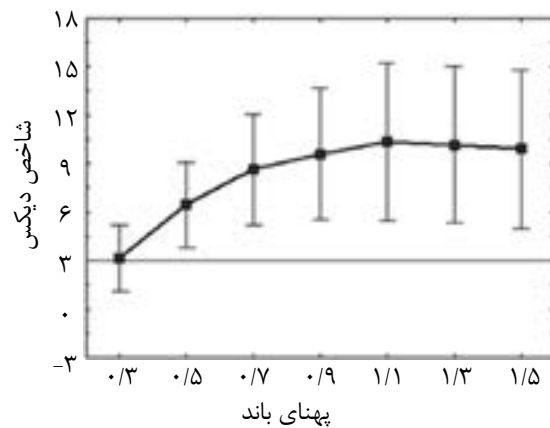
سری‌های متفاوت نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود برای سری‌های زمانی متفاوت، با افزایش پهنای باند مقادیر شاخص دیکس افزایش می‌یابد و در پهنای باند برابر با مقدار ۱/۱، شاخص دیکس حداکثر مقدار خود را دارد که بسیار بالاتر از مقدار ۳ می‌باشد که نشان می‌دهد در این پهنای باند، روش دیکس حساسیت بالایی نسبت به تغییر سری زمانی از خود نشان می‌دهد.

حالت هیدرودینامیکی بستر سیال حاصل از دو سری زمانی متفاوت با استفاده از شاخص دیکس با هم مقایسه شده‌اند. این سری‌های زمانی بیانگر سیگنال‌های حاصل از ارتعاش در یک بستر سیال با انواع مختلف ذرات داخل آن می‌باشد. در صورتی که مقدار شاخص دیکس از ۳ بیشتر شود، با ۹۵٪ اطمینان می‌توان گفت که تغییری در هیدرودینامیک بستر سیال رخ داده است. اگر چه این تست ماهیت و منشأ تغییر را مشخص نمی‌کند ولی با توجه به پارامترهایی که در هر آزمایش تغییر می‌کند، می‌توان نتیجه گرفت که این تغییرات به تغییرات حجم ذرات در بستر مربوط بوده است. شکل ۶ تغییرات شاخص دیکس حاصل از مقایسه دو سری زمانی را با حالت مرجع ($L/D=1$) و برای مکان‌های مختلف قرارگیری شتاب سنج در بستر نشان می‌دهد. هر یک از نقاط مقدار شاخص دیکس را برای سیگنال‌های ارتعاش محاسبه شده، نشان می‌دهد.

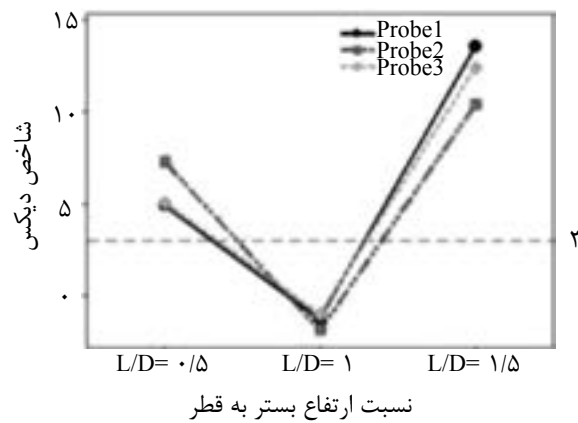
1. Time Delay



شکل ۴ تابع خود همبستگی یک نمونه از سیگنال‌های ارتعاش.



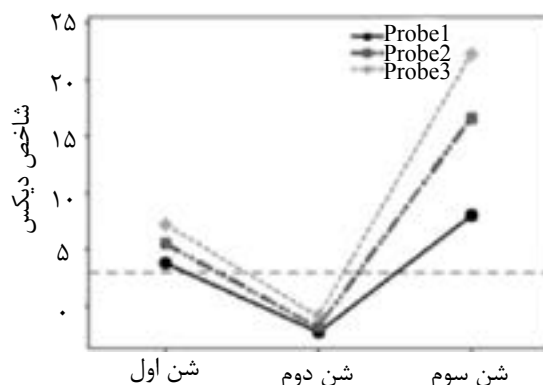
شکل ۵ روند تغییرات شاخص دیکس با پهنای باند به‌طور متوسط برای سری‌های متفاوت و یکسان.



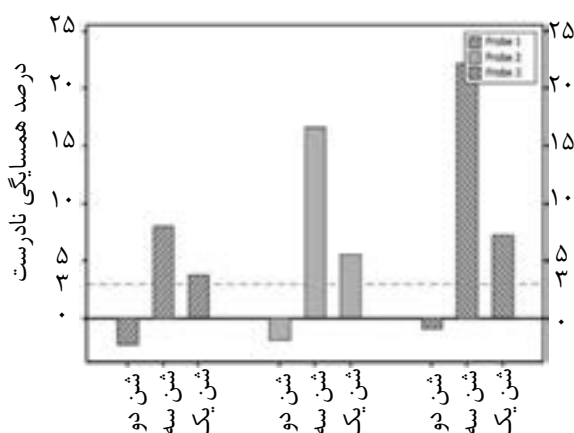
شکل ۶ مقادیر شاخص آماری دیکس برای مقایسه بین سری‌های زمانی مربوط به ارتفاع‌های مختلف ذرات در بستر.

می‌گیرد که نشان می‌دهد دو سری زمانی بیانگر یک حالت هیدرودینامیکی مشخص در بستر سیال هستند. در شکل (۷ و ۸) مقادیر S (شاخص دیکس) برای مقایسه شن‌های مختلف با شن شماره ۲ ($720 \mu\text{m}$) به‌عنوان مرجع) در ارتفاع ساکن بستر 15 cm ($L/D=1.0$) در مکان‌های اندازه‌گیری مختلف نشان داده شده است.

برای نمونه وقتی سری‌های زمانی حاصل از ارتعاش بستر با ارتفاع ذرات $7/5$ و $22/5$ cm با سری زمانی حالت مبنا مقایسه شده است، مقدار شاخص دیکس بالاتر از ۳ قرار گرفته است که نشان‌دهنده این موضوع است که دو سری زمانی بیانگر دو حالت مختلف هیدرودینامیکی در بستر هستند. در حالی که زمانی دو سری زمانی یکسان (ارتفاع 15 cm) با هم مقایسه می‌شوند، مقدار شاخص دیکس زیر ۳ قرار



شکل ۷ مقادیر شاخص آماری دیکس برای مقایسه بین سری‌های زمانی مربوط به شن‌های مختلف با شن شماره ۲.



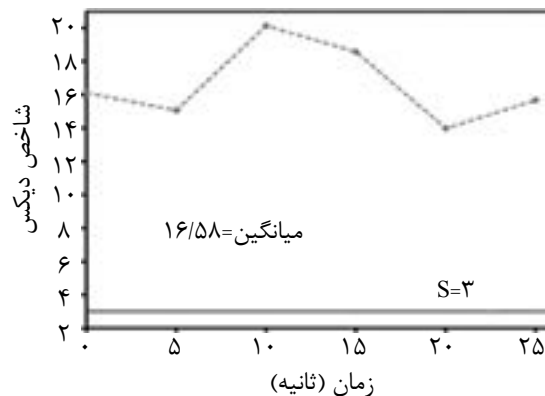
شکل ۸ مقادیر شاخص آماری دیکس برای مقایسه بین سری‌های زمانی مربوط به شن‌های مختلف با شن شماره ۲.

در سیستم‌های مشابه استفاده نمود. روند دیگری که از نمودار فوق می‌توان مشاهده نمود این است که با افزایش ارتفاع مکان اندازه‌گیری (مکان پروب) مقادیر S افزایش می‌یابد که نشان‌دهنده افزایش حساسیت سیستم است. برای توجیه این موضوع می‌توان از دلایل زیر استفاده نمود: در مکان‌های پروب نزدیک به توزیع‌کننده، سیگنال عمدتاً ناشی از حرکت سریع موج فشاری است در حالی که در مکان‌های بالاتر از توزیع‌کننده (دورتر از توزیع‌کننده) سیگنال عمدتاً متأثر از عبور حباب‌ها است که عامل تعیین‌کننده تری از حرکت موج فشاری است [۲۴]. عامل دیگر این است که تغییرات توزیع اندازه ذرات منجر به تغییرات در تخلخل و در نهایت ارتفاع بستر می‌شود که این به نوبه خود باعث تاثیر بر نوسانات فشار زیر سطح بستر می‌شود. همچنین به دلیل انبساط اولیه سطح بستر در اثر سرعت، ارتفاع بستر از حالت ساکن بستر (۱۵ cm)

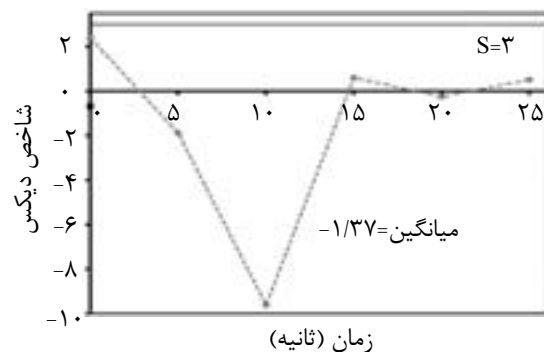
همان‌گونه که مشاهده می‌شود، مقادیر S در مقایسه شن‌های مختلف بالاتر از مقدار ۳ قرار گرفته‌اند که این روند در مکان‌های اندازه‌گیری (مکان پروب) مختلف نیز مشاهده می‌شود. این مشاهده نشان می‌دهد که این روش به تغییر در اندازه ذرات شن حساس می‌باشد. همچنین در مقایسه دو شن یکسان با هم (شن شماره ۲: $720 \mu\text{m}$) مقدار S پایین‌تر از ۳ قرار گرفته است که نشان‌دهنده این موضوع است که تغییری در اندازه ذرات رخ نداده است. همچنین همان‌گونه که در شکل ۷ دیده می‌شود، شیب تغییرات شاخص دیکس در حالتی که شن ۲ با ۳ مقایسه می‌شود بیشتر از حالتی است که شن ۱ با ۲ مقایسه می‌شود. این اختلاف به این دلیل است که اندازه شن ۲ با ۳ در مقایسه با شن ۱ با ۲، بیشتر است (در حدود ۲ برابر). از نتایج حاصل از این روش می‌توان برای شناسایی کلوخه شدن در راکتورهای بستر سیال و

بیشتر می‌شود و از آنجایی که قسمت اعظم این نوسانات در زیر سطح بستر منتشر می‌شود، به همین دلیل مکان اندازه‌گیری بالاتر بیشتر تحت تاثیر قرار می‌گیرد. در شکل (۹) نتایج حاصل از مقایسه دو جاذب ساخته شده از سری‌های زمانی مرجع و ارزیابی^۱ در دو سرعت متفاوت نشان داده شده است. 0.16 m/s به عنوان سری مرجع و سرعت $1/4 \text{ m/s}$ به عنوان سری زمانی ارزیابی در نظر گرفته شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود مقدار متوسط S بالای ۳ می‌باشد که نشان می‌دهد دو سری زمانی از یک حالت هیدرودینامیکی نشأت نگرفته‌اند با توجه به این که در اینجا سرعت 0.16 m/s مربوط به رژیم سیالیت حبابی^۲ و سرعت

مربوط به رژیم سیالیت درهم^۳ در بستر می‌باشد، می‌توان نتیجه گرفت که روش آماری شاخص دیکس به تغییرات در هیدرودینامیک بستر سیال ناشی از تغییر سرعت و تغییر رژیم جریانی حساسیت مناسبی نشان می‌دهد. در ادامه شکل (۱۰) آورده شده است که نتایج حاصل از مقایسه دو جاذب ساخته شده از سری زمانی مرجع و ارزیابی را در سرعت یکسان 0.16 m/s نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود، مقدار متوسط S زیر ۳ قرار گرفته است که نشان‌دهنده این موضوع است که دو سری زمانی از یک حالت هیدرودینامیکی حاصل شده‌اند.



شکل ۹ مقادیر شاخص آماری دیکس برای سری‌های زمانی مربوط به سرعت $1/4 \text{ m/s}$ در مقایسه با سرعت مرجع (0.16 m/s).



شکل ۱۰ مقادیر شاخص آماری دیکس برای سری‌های زمانی یکسان (0.16 m/s).

1. Reference and Evaluation Time Series
2. Bubbling Regime
3. Turbulent Regime

نتیجه گیری

مقدار شاخص دیکس بالاتر از ۳ قرار گرفت. ولی هنگامی که دو سری مشابه با هم مقایسه شدند؛ مقدار شاخص دیکس به زیر ۳ منتقل شد. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که شاخص آماری دیکس قادر است رفتار راکتورهای چند فاز را پیش‌بینی نماید.

علائم و نشانه‌ها

- d : بعد محاطی
- f_c : فرکانس نمونه برداری (Hz)
- L : ارتفاع بستر (m)
- Q : مجذور فاصله بین دو جاذب
- S : شاخص آماری دیکس
- V_c : واریانس شرطی
- $x(i)$: داده نقطه‌ای سری زمانی
- t : تاخیر زمانی

در این تحقیق از روش غیرتداخلی ارتعاشات به منظور شناخت هر چه بهتر هیدرودینامیک بستر برای تعیین پارامترهای هیدرودینامیکی بستر سیال استفاده شده است و ارزیابی سری زمانی سیگنال‌های ارتعاشی بستر، در حوزه فضای حالت صورت گرفته است. شاخص دیکس براساس مقایسه دو جاذب استوار است و با مقایسه جاذب‌های دو سری زمانی با هم می‌تواند تشخیص دهد که این دو سری زمانی از یک هیدرودینامیک نشات گرفته‌اند یا خیر. با مقایسه جاذب‌های دو سری زمانی با هم و به‌دست آوردن مقدار شاخص دیکس برای چند حالت مختلف، مشاهده شد زمانی که دو سری حاصل از سیگنال‌های ارتعاش دو حالت بستر با حجم یا اندازه ذرات مختلف و یا رژیم جریان متفاوت (حبابی و درهم)، با هم مقایسه شدند؛

مراجع

- [1]. Kunii D. and Levenspiel O., "Fluidization Engineering," 2nd ed., Butterworth-Heinemann, Boston, USA, 1991.
- [2]. Bi H. T., and Grace J. R., "Effect of measurement method on the velocities used to demarcate the onset of turbulent fluidization," *The Chemical Engineering, Journal and the Biochemical Engineering*, Vol. 57, No. 3, pp. 261-271. 1995.
- [3]. Bi H. T., Ellis N., Abba I. A., and Grace J. R., "A state-of-the-art review of gas-solid turbulent fluidization," *Chemical Engineering Science*, Vol. 55, No. 21, pp. 4789-4825. 2000.
- [4]. Chen A. and Bi H. T., "Pressure fluctuations and transition from bubbling to turbulent fluidization," *Powder Technology*, Vol. 133, No. 1, Issues 1-3, pp. 237-246, 30 July 2003.
- [5]. Xu C., Cheng Y., and Zhu J., "Fluidization of fine particles in a sound field and identification of group C/A particles using acoustic waves," *Powder Technology*, Vol. 161, No. 3, pp. 227-234. 2006.
- [6]. Naelapää K., Veski P., Pedersen J. G., Anov D., Jørgensen P., Kristensen H. G., and Bertelsen P., "Acoustic monitoring of a fluidized bed coating process," *International Journal of Pharmaceutics*, Vol. 332, No. 1, pp. 90-97. 2007.
- [7]. Book G., Albion K., Briens L., Briens C., and Berruti F., "On-line detection of bed fluidity in gas-solid fluidized beds with liquid injection by passive acoustic and vibrometric methods," *Powder Technology*, Vol. 205, No. 1, pp. 126-136. 2011.

- [8]. Vervloet D., Nijenhuis J., and Van Ommen J. R., "Monitoring a lab-scale fluidized bed dryer: A comparison between pressure transducers, passive acoustic emissions and vibration measurements," Powder Technology, Vol. 197, No. 1, pp. 36-48. 2010.
- [9]. van Ommen J. R., Schouten J. C., and van den Bleek C. M., "An early-warning-method for detecting bed agglomeration in fluidized bed combustors," In Proceedings of the 15th International Conference on Fluidized Bed Combustion No. 150, ASME, New York, Paper. 1999.
- [10]. Daw C. S., and Halow J. S., "Evaluation of control of fluidization quality through chaotic time series analysis of pressure-drop measurements," (No. CONF-921104--10). Oak Ridge National Lab., TN (United States). 1992.
- [11]. Wright J., "Monitoring changes in time of chaotic nonlinear systems," Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science, Vol. 5, No. 2, pp. 356-366. 1995.
- [12]. Kennel M. B. "Statistical test for dynamical nonstationarity in observed time-series data," Physical Review E, Vol. 56, No. 1, p. 316. 1997.
- [13]. Daw C. S., Finney C. E. A., Nguyen K., and Halow J. S., "Symbol statistics: a new tool for understanding multiphase flow phenomena," Power, Vol 1, No. 02, pp. 1-10. 1998.
- [14]. Finney C. E. A., Nguyen K., Daw C. S., and Halow, J. S., "Symbol-Sequence Statistics for Monitoring Fluidization," Proc. of ASME Heat Transfer Division, Vol. 5, R. A. Nelson, Jr., T. Chopin, S. T. Thynell (editors), ASME, New York, 405-412. 1998.
- [15]. Schouten J. C., and Van den Bleek C. M., "Monitoring the quality of fluidization using the short-term predictability of pressure fluctuations," AIChE Journal, Vol. 44, No. 1, pp. 48-60. 1998.
- [16]. Van Ommen J. R., Coppens M. O., Van Den Bleek C. M., and Schouten J. C., "Early warning of agglomeration in fluidized beds by attractor comparison". *AIChE Journal*, Vol. 46, No. 11, pp. 2183-2197. 2000.
- [17]. Diks C., Van Zwet W. R., Takens F., and DeGoede J., "Detecting differences between delay vector distributions". *Physical Review E*, Vol. 53, pp. 2169-2176. 1996.
- [18]. van Ommen, J. R., Coppens, M. O., Van den Bleek, C. M., & Schouten, J. C., "Early warning of agglomeration in fluidized beds by attractor comparison," *AIChE Journal*, Vol. 46, No. 11, pp. 2183-2197. 2000.
- [19]. Packard N. H., Crutchfield J. P., Farmer, J. D., and Shaw R. S., "Geometry from a time series," *Physical Review*, Vol. 45, pp. 712-715. 1980.
- [20]. Takens F., "Detecting strange attractors in turbulence," *Lecture Notes in Mathematics*, Vol. 898, Dynamical Systems and Turbulence, D. A. Rand and L.S. Young(editors), Springer Verlag, Berlin, Germany, pp. 366-373. 1981.
- [۲۱]. عزیزپور ه.، "تأثیر تغییرات اندازه ذرات بر روی ارتعاشات راکتورهای بستر سیال"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشکده مهندسی شیمی ۱۳۸۹.
- [22]. Tamadondar M. R., Zarghami R., Azizpour H., Mostoufi N., Chaouki J. and Radmanesh R., "Using S-statistic for investigating the effect of temperature on hydrodynamics of gas-solid fluidization," *Particuology*, Vol. 11, pp. 288-293. 2013.
- [23]. Shiea M., Sotudeh-Gharebagh R., Azizpour H., Mostoufi N. and Zarghami R., "Predicting Transition Velocities from Bubbling to Turbulent Fluidization by S Statistics on Vibration Signals," *Particulate Science and Technology*, 31, 10-15.
- [24]. Van der Schaaf J., Schouten J. C., Johnsson F., and Van den Bleek C. M., "Decomposition of Power Spectral Density in Gas-Solids Fluidized Beds," *Proc. Third Int. Conf. on Multiphase Flow 98*, Lyon, France 1998.